

УДК 669.017

*Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, З. М. Ловшенко, А. С. Федосенко***ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ШИХТЫ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ДЛЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

UDC 669.017

*F. G. Lovshenko, G. F. Lovshenko, Z. M. Lovshenko, A. S. Fedosenko***OPTIMIZING THE MIXTURE COMPOSITION OF MECHANICALLY ALLOYED POWDERS USED FOR GAS-THERMAL COATINGS****Аннотация**

Представлены результаты исследований влияния состава шихты для механического легирования порошков, применяемых при газотермическом нанесении покрытий различного функционального назначения, обладающих высокой износостойкостью, жаропрочностью и коррозионной стойкостью.

Ключевые слова:

порошки, композиционные материалы, реакционное механическое легирование, состав, газотермические покрытия, износостойкость, жаропрочность, шихта.

Abstract

The paper presents research findings on the effects of mixture composition in mechanical alloying of powders used for gas-thermal coatings for various functional applications, which are characterized by high wear, heat and corrosion resistance.

Key words:

powders, composite materials, reactive mechanical alloying, composition, gas-thermal coatings, wear resistance, heat resistance, mixture.

Введение

Ряд технически значимых деталей, определяющих долговечность машин и механизмов, работают в условиях интенсивного изнашивания и воздействия различных агрессивных сред. Упрочнение и восстановление их является важной научно-технической задачей. Для этой цели получили широкое применение термическая обработка и нанесение покрытий гальваническими, химическими, химико-термическими методами, а также газотермическим напылением. Последний метод имеет ряд преимуществ экономического и технологического плана: обеспечивает высокую производительность, характеризуется

относительно небольшой трудоемкостью и не вызывает существенной деформации основы; позволяет проводить восстановление и ремонт изношенных деталей различной формы, обрабатывать как всю деталь, так и ее отдельные участки. Газотермические способы обеспечивают получение покрытий, обладающих специальными свойствами – износостойкостью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью, и позволяют решить ряд проблем машиностроительной отрасли. Из газотермических способов, включающих детонационный, электродуговой, газопламенный, плазменный, два последних отличаются высокой производительностью и хорошим качеством покрытий. Достоинством их

является также возможность регулирования в процессе напыления состава материала и структуры, что позволяет дополнительно повысить физико-механические свойства покрытий.

Для широкого промышленного применения газопламенного и плазменного способов наряду с созданием и внедрением высокопроизводительного автоматизированного оборудования и новых технологических процессов актуальными являются вопросы разработки и освоения низкзатратных, экологически безопасных, высокоэффективных, простых и универсальных технологий производства новых порошковых материалов, обладающих необходимым комплексом физико-механических свойств.

В последнее время для производства композиционных порошков различного состава находит применение реакционное механическое легирование, основанное на обработке шихты, состоящей из дешевых промышленно выпускаемых порошков, в энергонапряженных мельницах – механореакторах, при которой протекают механически активируемые структурные и фазовые превращения, вызывающие формирование материалов с субмикроструктурной структурой основы, характеризующейся высокоразвитой поверхностью границ зерен и субзерен, стабилизированной наноразмерными включениями механически синтезированных упрочняющих фаз, что обеспечивает высокий упрочняющий эффект, сохраняющийся практически до температуры плавления основы.

Механически легированные порошки независимо от их состава являются композиционными материалами; имеют однородное распределение элементов, нанокристаллический тип структуры с размером зерен основы менее 100 нм, состоящих из субзерен величиной менее 50 нм, стабилизированной дисперсными включениями упрочняющих фаз. Они обладают комплексным упрочнением, сочетающим твердо-

растворное, дисперсионное, зернограничное и дисперсное при решающей роли двух последних, и являются неравновесными системами, в которых наряду с равновесными фазами существуют промежуточные соединения и исходные легирующие компоненты. Фазовый состав порошков достигает равновесного состояния после термического воздействия при температурах выше $0,5T_{пл. основы}$. При этом они сохраняют наноразмерный тип структуры, являются жаропрочными, по твердости в интервале температур 20...1000 °С существенно превосходят аналоги и перспективны в качестве материалов для газотермических износостойких покрытий различного функционального назначения.

В работе представлены результаты по оптимизации состава шихты, ряда перспективных композиций на основе железа, обеспечивающих получение порошков для газотермических покрытий различного функционального назначения, являющихся износостойкими и жаропрочными.

Методика исследования

Получение порошковых материалов основывалось на оптимальных значениях технологических параметров процесса механического легирования в энергонапряженной вибромельнице, обеспечивающих максимальную твердость композиционных порошков для конструкционных материалов [1] и газотермических покрытий. Независимо от состава они находятся в пределах: ускорение рабочих тел – 135...145 м·с⁻²; отношение объемов рабочих тел и шихты – 10...12; степень заполнения полевой камеры рабочими телами – 75...80 %; время обработки в механореакторе – 8...10 ч.

Нанесение покрытий осуществлялось на следующих режимах: сила тока – 240...250 А; напряжение – 190...200 В; мощность – 45...49 кВт; дистанция напыления – 250...300 мм; диаметр трубки –

3,1...3,3 мм; расстояние от среза сопла до выходного отверстия – 4...5 мм.

В качестве параметров, определяющих оптимальный состав шихты для механически легированных порошков, выбраны твердость HV и относительная износостойкость $I_{отн}$ покрытий, полученных из них. Оптимизация проходила в два этапа. На первом этапе методом однофакторного эксперимента определялось оптимальное содержание легирующих компонентов в исходной шихте, на втором – с применением центрального композиционного ортогонального планирования второго порядка математически описывалась область оптимума. При этом результаты первого этапа исследования использовались для установления граничных значений факторов. Определение фазового состава и структуры покрытий, полученных из порошков оптимального состава, проводилось с применением стандартных

методик рентгеноструктурного, металлографического и электронно-микроскопического анализа.

Базовые композиции на основе железа представляли собой системы порошков: 1) «Fe–Al» (ЖА); 2) «Fe–Al–Fe₂O₃» (ЖА–ДУ); 3) «Fe–Cr–C» (Х6); 4) «Fe–Cr–Ni–Al–MoO₃» (15Х18Н10Т–ДУ); 5) «Fe–Cr–Ni» (15Х2Н4). Предполагалось, что они обеспечат получение композиционных порошков для газотермических износостойких жаропрочных покрытий следующего функционального назначения: для упрочнения инструмента и конструкционных изделий, работающих при больших нагрузках в условиях интенсивного износа (Х6, ЖА, ЖА–ДУ); коррозионно-стойких (15Х18Н10Т–ДУ, ЖА, ЖА–ДУ); для восстановления конструкционных изделий общего назначения (15Х2Н4). Состав базовых композиций и их обозначение (марка) соответствуют приведенным в табл. 1.

Табл. 1. Состав исследуемых композиций

Содержание компонентов, %	Химический состав, %	Аналог
26 % БЧ; 20 % ПХ30; Ж2М2 (ост.)	1 % С, 6 % Сг, 0,45 % О, Fe (ост.)	Х6
6,6 % ПХ30; 4 % ПНК-ОНТ2; ПЖ2М2 (ост.)	0,15 % С; 0,45 % О; 2 % Сг, 4 % Ni, Fe (ост.)	15Х2Н4
59 % ПХ30; 10 % ПНК-ОНТ2; 0,5 % Ti; 1% ПА4; 1,4 % МоО ₃ ; ПЖ2М2 (ост.)	0,15 % С; 0,9 % О; 18 % Сг; 10 % Ni; 0,9 % Мо; 1 % Al; Fe (ост.)	15Х18Н10-ДУ
30 % ПА4; 0,3 % C ₁₇ H ₃₅ COOH; ПЖ2М2 (ост.)	0,4 % С; 0,45 % О; 30 % Al; Fe (ост.)	ЖА
30 % ПА4; 0,3 % C ₁₇ H ₃₅ COOH; 7,8 %; Fe ₂ O ₃ ; ПЖ2М2 (ост.)	0,4 % С; 2,8 % О; 30 % Al; Fe (ост.)	ЖА-ДУ

Следует отметить, что законченные и систематизированные результаты исследований, направленные на создание технологии производства, установление закономерностей формирования фазового состава структуры и свойств механически легированных композиционных порошков на основе нижеприведенных систем и получение газотермических покрытий из них, кроме сведений, представленных в [1–5], отсутствуют.

При определении влияния на параметры оптимизации содержания в исходной шихте легирующих компонентов независимыми переменными являлись: 1) «Fe–Al» – алюминий и стеариновая кислота; 2) «Fe–Al–Fe₂O₃» – алюминий и оксид железа (Fe₂O₃); 3) «Fe–Cr–C» – ПХ30 и белый чугун; 4) «Fe–Cr–Ni–Al–MoO₃» – алюминий и оксид молибдена (MoO₃); 5) «Fe–Cr–Ni–C» (15Х2Н4) – хром и углерод. Результаты исследования представлены на рис. 1...5.

Результаты исследований

В системах «Fe–Al» и «Fe–Al–Fe₂O₃» (см. рис. 1 и 2) возрастание износостойкости покрытий с повышением содержания в исходной шихте алюминия и стеариновой кислоты обусловлено увеличением в структуре количества интерметаллидов Fe₃Al, FeAl, а также мартенсита и степени его пересыщения. В компози-

ции «Fe–Al–Fe₂O₃» имеет место дополнительное упрочнение наноразмерными включениями оксида алюминия Al₂O₃, образующимися в результате механически и термически активируемых окислительно-восстановительных реакций между алюминием и оксидом железа, протекающих при получении композиционных порошков и нанесении покрытий из них.

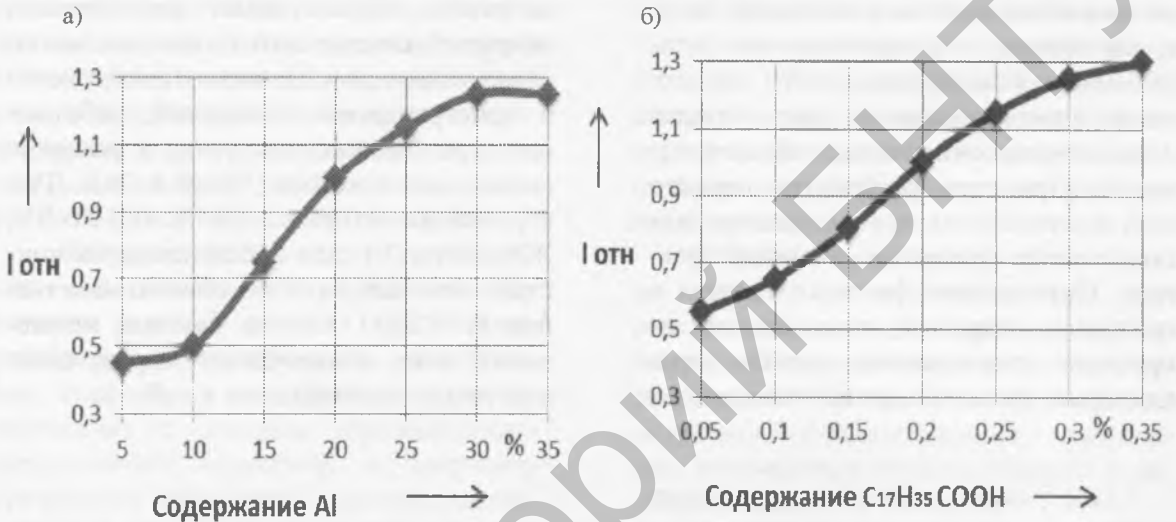


Рис. 1. Влияние содержания в шихте алюминия (а) и стеариновой кислоты (б) на относительную износостойкость покрытий из механически легированных порошков системы «Fe–Al»: а – 0,20 % C₁₇H₃₅COOH; б – 20 % Al

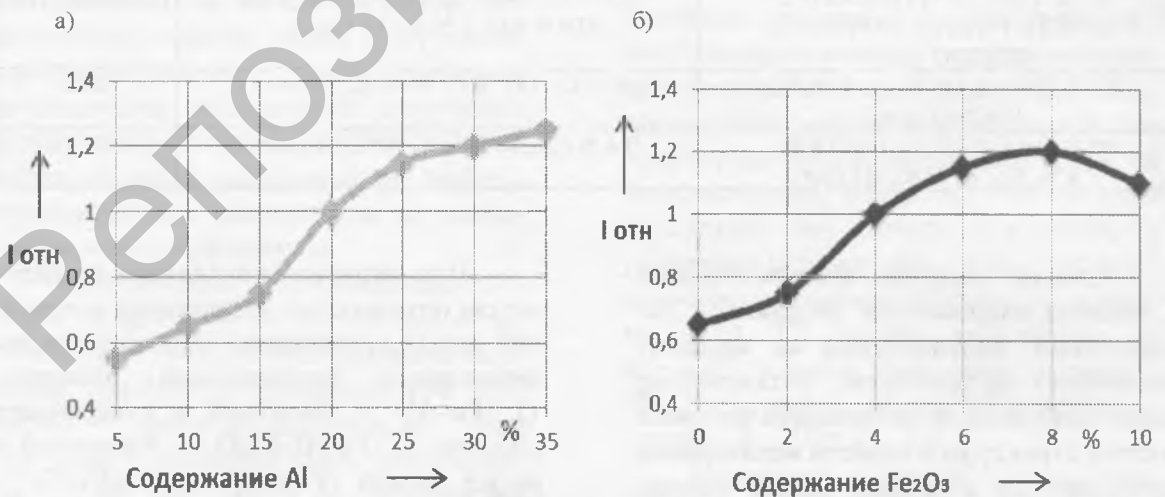


Рис. 2. Влияние содержания в шихте алюминия (а) и оксида железа (б) на относительную износостойкость покрытий из механически легированных порошков системы «Fe–Al–Fe₂O₃»: а – 4 % Fe₂O₃; б – 20 % Al

В системе «Fe–Cr–C» увеличение в исходной шихте количества белого чугуна и железохромового сплава ПХ30 (поставщиков углерода и хрома), соответственно, приводит к росту твердости и износостойкости покрытий, получаемых из механически легированных композиционных порошков (см. рис. 3). Это обусловлено повышением концентрации углерода и хрома в мартенсите, являющегося основой структуры покрытия, и увеличением содержания в ней наноразмерных включений синтезированных в процессе реализации технологии карбидов хрома, вызывающих дисперсное упрочнение.

Увеличение содержания алюминия и оксида молибдена в исходной шихте при производстве порошков системы «Fe–Cr–Ni–Al–MoO₃» для напыления коррозионно-стойкого жаропрочного покрытия типа 15X18Н10-ДУ приводит к росту его твердости и относи-

тельной износостойкости (см. рис. 4). Это объясняется тем, что в процессе реакционного механического легирования и последующего плазменного напыления покрытия происходит механически и термически активируемое взаимодействие между компонентами шихты, приводящее к образованию наноразмерных фаз, например, оксида алюминия, способных эффективно упрочнять и стабилизировать структуру материала, препятствуя протеканию рекристаллизационных процессов.

Повышение содержания углерода и хрома в исходной шихте при изготовлении механически легированных порошков для напыления конструктивных покрытий системы «Fe–Cr–Ni–C» (15X2Н4) приводит к увеличению их твердости и относительной износостойкости (см. рис. 5), обусловленному ростом количества карбидов и мартенсита и степени легированности последнего.

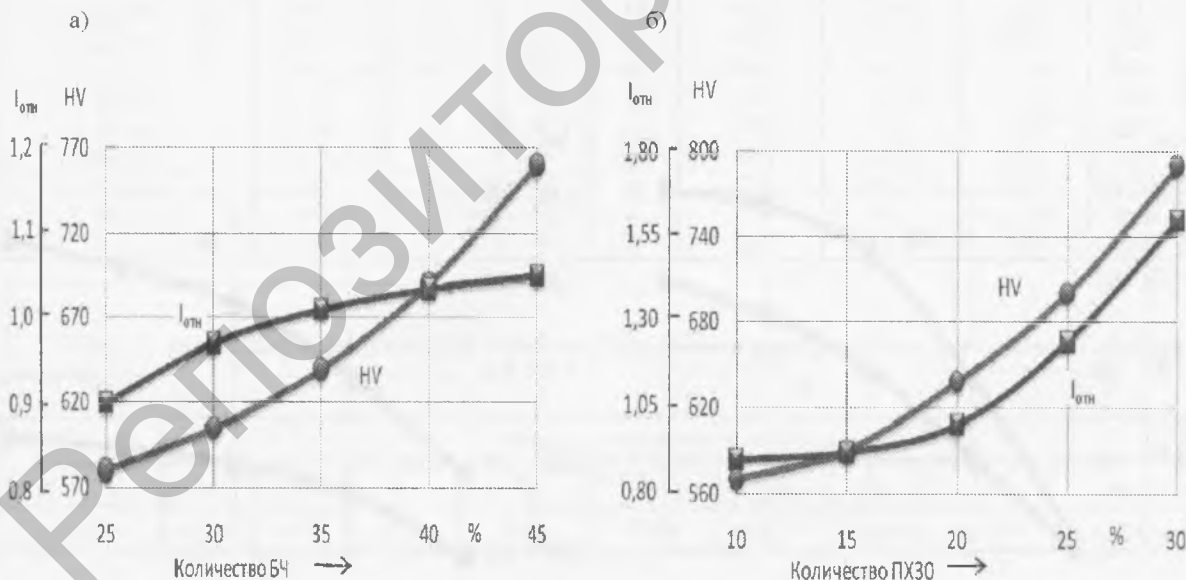


Рис. 3. Влияние содержания в шихте порошков белого чугуна (БЧ) (а) и железохромового сплава ПХ30 (б) на твердость и относительную износостойкость покрытий из механически легированных порошков системы «Fe–Cr–C»: а – 20 % ПХ30; б – 35 % белого чугуна

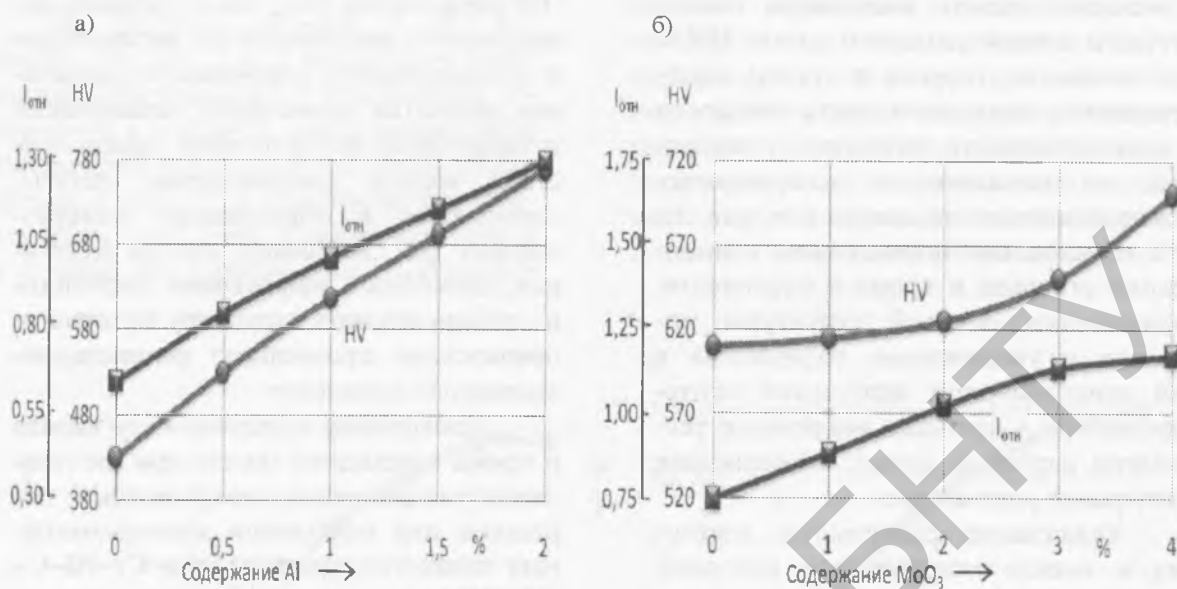


Рис. 4. Влияние содержания в шихте алюминия (а) и MoO₃ (б) на твердость и относительную износостойкость покрытий из механически легированных порошков системы «Fe–Cr–Ni–Al–MoO₃»: а – 2 % MoO₃; б – 1 % алюминия

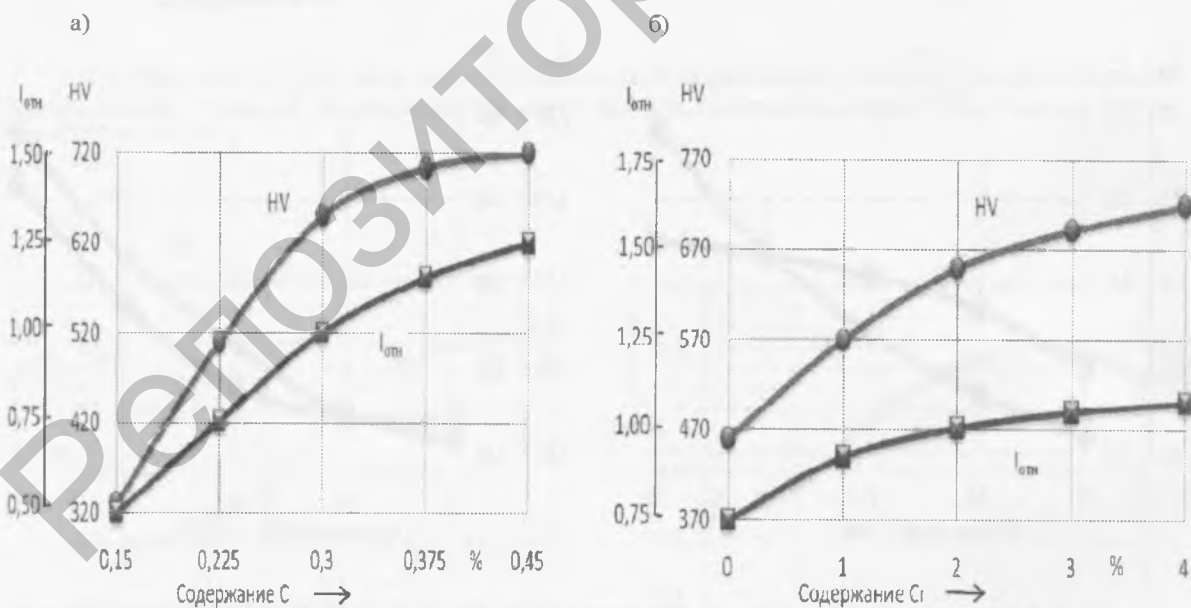


Рис. 5. Влияние содержания в шихте углерода (а) и хрома (б) на твердость и относительную износостойкость покрытий из механически легированных порошков системы «Fe–Cr–Ni–C»: а – 2 % Cr; б – 0,3 % C

Описание области оптимума состава шихты для механически легированных порошков на основе железа

Описание области оптимума направлено на установление совместного влияния компонентов шихты на свойства покрытий. Для решения этой задачи реализован центральный композиционный ортогональный план второго порядка.

Композиции «Fe-Al», «Fe-Al-Fe₂O₃». В системе «Fe-Al» независимым фактором являлось содержание в исходной шихте алюминия (X_1) и стеариновой кислоты (x_2); в системе «Fe-Al-Fe₂O₃» – алюминия (x_1) и оксида железа Fe₂O₃ (x_2). Матрицы планирования, результаты экспериментов и статистической обработки экспериментальных данных при описании области оптимума для системы приведены в табл. 2...5.

Табл. 2. Матрица планирования и результаты эксперимента при оптимизации состава механически легированных порошков системы «Fe-Al» из шихты «ПЖ2М2-ПА4-ПАВ»

Характеристика	Фиктивная переменная	Фактор					Параметр оптимизации	
		основной		производный			Относительная износостойкость	
		Al, %	ПАВ, %					
Основной уровень		20	0,20					
Интервал варьирования (I)		10	0,10					
Верхний уровень		30	0,30					
Нижний уровень		10	0,10					
Код	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	$x_1^2 - x_2^2$	$x_2^2 - x_1^2$	эксперимент.	расчет.
Опыты								
1(10)	+1	-1	1	+1	+1/3	+1/3	0,35	0,32
2(11)	+1	-1	+1	-1	+1/3	+1/3	0,65	0,66
3(12)	+1	+1	+1	+1	+1/3	+1/3	1,45	1,50
4(13)	+1	+1	-1	-1	+1/3	+1/3	0,80	0,80
5(14)	+1	+1	0	0	+1/3	-2/3	1,25	1,21
6(15)	+1	-1	0	0	+1/3	-2/3	0,50	0,55
7(16)	+1	0	+1	0	-2/3	+1/3	1,25	1,21
8(17)	+1	0	-1	0	-2/3	+1/3	0,65	0,69
9(18)	+1	0	0	0	-2/3	-2/3	1,00	1,01

Табл. 3. Результаты статистической обработки экспериментальных данных при описании области оптимума

Параметр	Результат статистической обработки								
	b_0'	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}	$\Delta b_0'$	Δb_0
$I_{\text{отн}}$	0,88	1,01	0,33	0,26	0,09	-0,13	-0,06	$\pm 0,023$	$\pm 0,1$

Продолжение табл. 3

Параметр	Результат статистической обработки								
	Δb_i	Δb_{ij}	Δb_{ii}	S_y^2	$S_{\text{ан}}^2$	f_1	f_2	$F_{0,05}^{\text{расч}}$	$F_{0,05}^{\text{табл}}$
$I_{\text{отн}}$	$\pm 0,03$	$\pm 0,04$	$\pm 0,06$	0,0026	0,0024	9	3	1,0	3,9

Табл. 4. Матрица планирования и результаты эксперимента при оптимизации состава механически легированных порошков системы «Fe–Al–Fe₂O₃» из шихты «ПЖ2М2–ПА4–Fe₂O₃–0,30 % ПАВ»

Характеристика	Фиктивная переменная	Фактор					Параметр оптимизации	
		основной		производный			Относительная износостойкость	
		Al, %	Fe ₂ O ₃ , %					
Основной уровень		20	4					
Интервал варьирования (I)		10	4					
Верхний уровень		30	8					
Нижний уровень		10	0					
Код	x ₀	x ₁	x ₂	x ₁ x ₂	$x_1^1 = x_1^2 - 2/3$	$x_2^1 = x_2^2 - 2/3$	эксперимент.	расчет.
Опыты								
1(10)	+1	-1	-1	+1	+1/3	+1/3	0,45	0,43
2(11)	+1	-1	+1	-1	+1/3	+1/3	0,95	0,97
3(12)	+1	+1	+1	+1	+1/3	+1/3	1,35	1,35
4(13)	+1	+1	-1	-1	+1/3	+1/3	0,75	0,81
5(14)	+1	+1	0	0	+1/3	-2/3	1,20	1,18
6(15)	+1	-1	0	0	+1/3	-2/3	0,80	0,85
7(16)	+1	0	+1	0	-2/3	+1/3	1,20	1,19
8(17)	+1	0	-1	0	-2/3	+1/3	0,65	0,65
9(18)	+1	0	0	0	-2/3	-2/3	1,00	1,02

Табл. 5. Результаты статистической обработки экспериментальных данных при описании области оптимума

Параметр	Результат статистической обработки								
	b ₀ '	b ₀	b ₁	b ₂	b ₁₂	b ₁₁	b ₂₂	Δb ₀ '	Δb ₀
I _{отн}	0,93	1,02	0,19	0,27	0,01	-0,03	-0,10	±0,03	± 0,11

Продолжение табл. 5

Параметр	Результат статистической обработки								
	Δb _i	Δb _{ij}	Δb _{ii}	S _y ²	S _{ал} ²	f ₁	f ₂	F _{0,05} расч.	F _{0,05} табл.
I _{отн}	± 0,03	± 0,04	± 0,06	0,0030	0,0021	9	5	0,7	5,2

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены математические модели, адекватно представляющие результаты экспериментов. Установленные зависимости имеют следующий вид:

– система «Fe–Al»

$$I_{отн} = 1,01 + 0,33 x_1 + 0,26 x_2 + 0,09 x_1 x_2 - 0,13 x_1^2 - 0,06 x_2^2; \quad (1)$$

– система «Fe–Al–Fe₂O₃»

$$I_{отн} = 1,02 + 0,19 x_1 + 0,27 x_2 - 0,10 x_2^2. \quad (2)$$

Графическая интерпретация полученных моделей представлена на рис. 6.

Проанализировав результаты, можно сделать вывод, что в исследованном интервале изменения факторов наибольшую износостойкость имеют покрытия из механически легированных композиций, полученных из шихты с максимальным содержанием легирующих компонентов. Дополнительно проведенные исследования показали, что дальнейшее увеличение их содержания создает технологические проблемы как на стадии производства порошка, так и при нанесении покрытия.

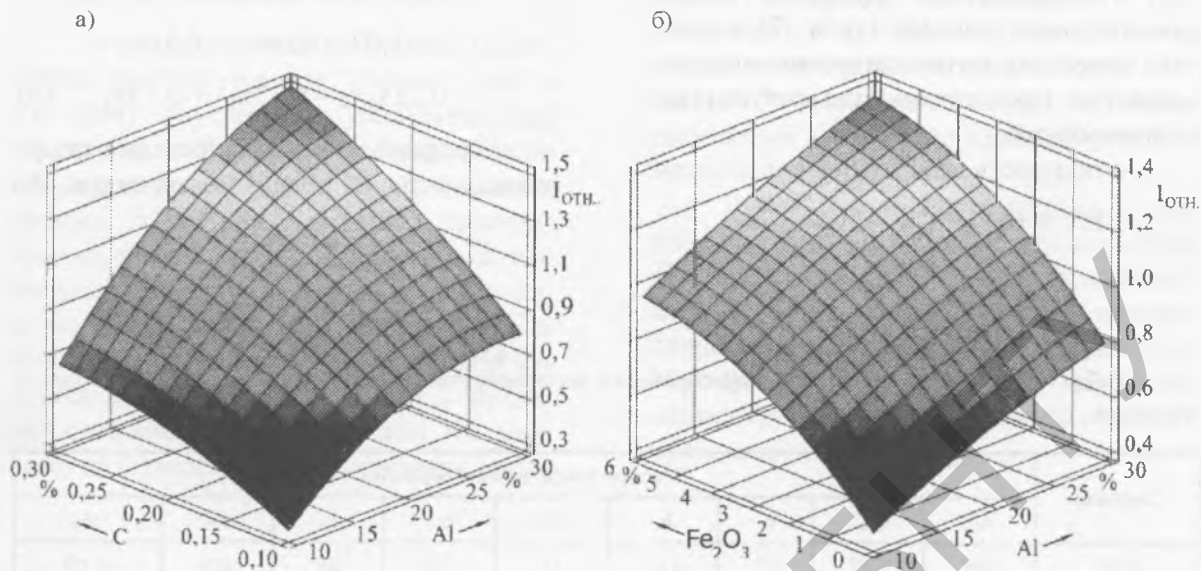


Рис. 6. Зависимость относительной износостойкости покрытий из механически легированных композиций систем «Fe–Al» (а) и «Fe–Al–Fe₂O₃» (б) от содержания легирующих компонентов в исходной шихте

Композиция «Fe–Cr–C». Матрица планирования и результаты эксперимента для покрытия, полученного из порошка системы «Fe–белый чугун–ПХ30», приведены в табл. 6. В роли факторов выступало количество белого чугуна и порошка ПХ30, вводимых в исходную шихту.

Табл. 6. Матрица планирования и результаты эксперимента при оптимизации состава покрытий из механически легированных композиций системы «Fe–белый чугун–ПХ30»

Характеристика	Фик- тивная пере- мен- ная	Фактор					Параметр оптимизации			
		основной		производный			Твердость HV		Относительная износостойкость	
		БЧ, %	ПХ30, %							
Основной уровень		35	20							
Интервал варьирования (I)		10	10							
Верхний уровень		45	30							
Нижний уровень		25	10							
Код	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	$x = x_1^2 - 2/3$	$x_2 = x_2^2 - 2/3$	HV _{экп.}	HV _{расч.}	экспери- мент.	расчет.
Опыты										
1(10)	+1	-1	-1	+1	+1/3	+1/3	520	517	0,46	0,46
2(11)	+1	-1	+1	-1	+1/3	+1/3	740	737	1,45	1,50
3(12)	+1	+1	+1	+1	+1/3	+1/3	910	911	1,25	1,24
4(13)	+1	+1	-1	-1	+1/3	+1/3	690	691	1,10	1,08
5(14)	+1	+1	0	0	+1/3	-2/3	760	757	1,05	1,03
6(15)	+1	-1	0	0	+1/3	-2/3	580	583	0,95	0,85
7(16)	+1	0	+1	0	-2/3	+1/3	790	791	1,60	1,50
8(17)	+1	0	-1	0	-2/3	+1/3	570	571	0,90	0,90
9(18)	+1	0	0	0	-2/3	-2/3	640	637	1,00	1,07

Статистическая обработка экспериментальных данных (табл. 7) позволила получить математические модели, адекватно представляющие результаты экспериментов:

– твердость покрытия

$$HV = 637 + 87x_1 + 110x_2 + 33x_1^2 + 44x_2^2; \tag{3}$$

– относительная износостойкость

$$I_{отн} = 1,07 + 0,09x_1 + 0,31x_2 - 0,21x_1x_2 - 0,13x_1^2 + 0,13x_2^2. \tag{4}$$

Графическая интерпретация полученных моделей представлена на рис. 7.

Табл. 7. Результаты статистической обработки экспериментальных данных при описании области оптимума

Параметр	Результат статистической обработки								
	b_0'	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}	$\Delta b_0'$	Δb_0
HV	688	637	87	110	0	33	44	± 5	± 19
$I_{отн}$	1,07	1,07	0,09	0,31	-0,21	-0,13	0,13	–	$\pm 0,05$

Продолжение табл. 7

Парамстр	Результат статистической обработки								
	Δb_i	Δb_{ij}	Δb_{ii}	S_y^2	$S_{ад}^2$	f_1	f_2	$F_{0,05}^{расч}$	$F_{0,05}^{табл}$
HV	± 6	± 8	± 11	91	25	9	4	0,27	—
$I_{отн}$	$\pm 0,06$	$\pm 0,07$	$\pm 0,10$	0,0089	0,0190	9	3	2,1	3,9

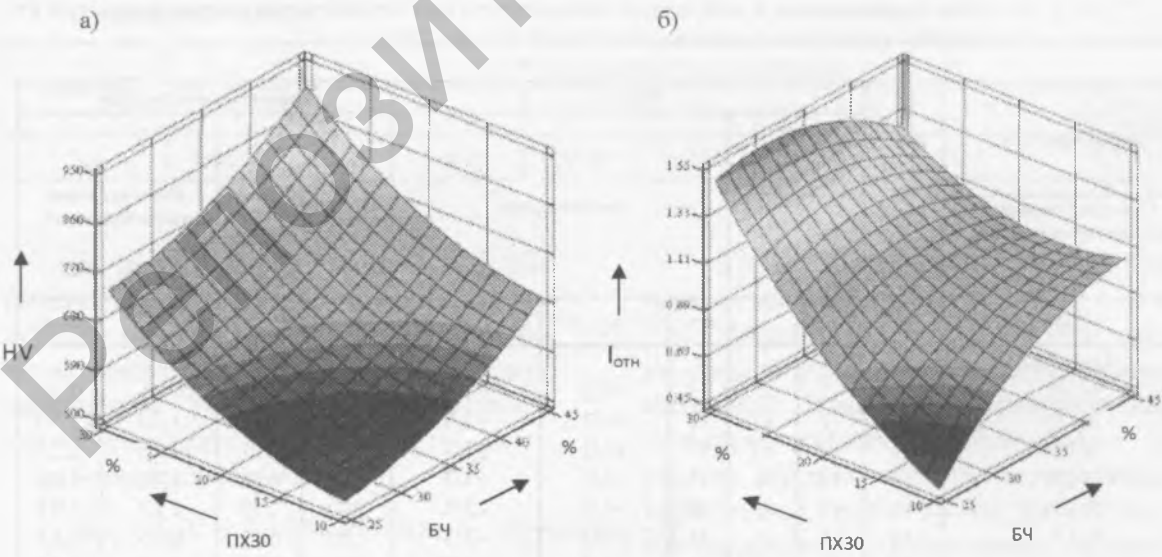


Рис. 7. Зависимость твердости (а) и относительной износостойкости (б) покрытий из порошка типа Х6 от количества белого чугуна и порошка ПХ30 в исходной шихте

Выводы

1. Существенное увеличение стойкости против износа (более чем в 1,6 раза) обусловлено особенностями структуры и фазового состава покрытий, определяющими их свойства; независимо от состава покрытия, полученные из механически легированных порошков, наследуют суб/микроструктурно-кристаллический тип структуры последних. Основой покрытий типов Х6 и 15Х2Н4 является мартенсит, Х18Н10 ДУ – аустенит с включениями мартенсита. Фазами, стабилизирующими и упрочняющими

основу, имеющую высокоразвитую границу зерен и субзерен, служат синтезированные в процессе производства порошков и напыления покрытия, наноразмерные включения карбидов, интерметаллидов и оксидов.

2. Разработанные покрытия имеют комплексное упрочнение, сочетающее твердорастворное, зернограницное, дисперсионное и дисперсное и определяющее их высокую износостойкость и жаропрочность в широком интервале температур, верхнее значение которых превышает 0,7 $T_{пл\text{ основы}}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов : монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко Б. Б. Хина ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко . – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с. : ил.
2. **Ловшенко, Ф. Г.** Формирование фазового состава, структуры и свойств механически легированных композиционных порошков на основе системы «железо–алюминий» и покрытий из них / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 1. – С. 36–49.
3. **Ловшенко, Ф. Г.** Композиционные механически легированные наноструктурные порошки на основе железа для газотермического напыления покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы V Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–17 сент. 2010 г. : в 3 кн. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2010. – Кн. 1. – С. 153–166.
4. **Ловшенко, Ф. Г.** Формирование фазового состава, структуры и свойств механически легированных стальных порошков и газопламенных покрытий из них / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, З. М. Ловшенко // Композиционные материалы в промышленности : материалы 31-й Междунар. конф., 6–10 июня. – Ялта, 2011. – С. 191–195.
5. **Ловшенко, Ф. Г.** Оптимизация состава композиционных механически легированных наноструктурных порошков на основе железа для газотермического напыления покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, З. М. Ловшенко // Композиционные материалы в промышленности : материалы 30-й Юбилейной междунар. конф., 7–11 июня. – Ялта, 2010. – С. 344–349.

Статья сдана в редакцию 27 марта 2013 года

Федор Григорьевич Ловшенко, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-296-25-21-26.

Григорий Федорович Ловшенко, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. E-mail: Greg-lovshenko@mail.ru.

Зинаида Михайловна Ловшенко, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Алексей Сергеевич Федосенко, лаборант, Белорусско-Российский университет.

Fedor Grigoryevich Lovshenko, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-296-25-21-26.

Grigory Fedorovich Lovshenko, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: Greg-lovshenko@mail.ru.

Zinaida Mikhailovna Lovshenko, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

Aleksey Sergeevich Fedosenko, laboratory assistant, Belarusian-Russian University.